УДК 620.179.13

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ МАССЫ ВОДЫ В СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов

НИИ интроскопии при Томском политехническом университете
E-mail: nesteruk@introscopy.tpu.ru

Приведены теоретические и экспериментальные результаты применения теплового метода неразрушающего контроля (инфракрасной термографии) для обнаружения воды в сотовых панелях авиационной техники в процессе эксплуатации. Показано, что тепловой контроль находит практическое применение в качестве скринингового метода, а количественная оценка скрытой воды по аномалиям поверхностного температурного поля требует дальнейших исследований.

Введение

В отечественных самолетах нового поколения широко используют сотовые конструкции (металлические и композиционные), которые обладают высокими прочностными характеристиками при малой массе [1]. Однако первые годы эксплуатации самолетов с сотовыми панелями (ИЛ-86, ИЛ-96, ТУ-204, ЯК-42) выявили возможность появления существенного эксплуатационного дефекта, а именно накопления воды в ячейках сот за счет конденсации и прямого проникновения атмосферной влаги. В первую очередь, сказанное относится к самолетам ТУ-204, которые идут на смену устаревшим отечественным лайнерам ТУ-154. Наличие значительной массы воды в сотовых панелях приводит не только к увеличению взлетной массы, но, главным образом, к ухудшению свойств клеевых соединений и возможному разрушению конструкций. В процессе полета и посадки вода претерпевает фазовые превращения, поскольку температура за бортом самолета изменяется от –50 до +50 °C. Увеличение объема воды при замерзании может вызвать разрушение ячеек сотовых конструкций, кроме того могут ухудшаться сцепные свойства клея, при помощи которого ячейки крепятся к несущим панелям. Наличие воды приводит также и к утяжелению сотовой конструкции, что увеличивает взлетный вес и сказывается на прочности панелей. Следует заметить, что сотовые конструкции использу-

ют в ответственных узлах самолетов: элеронах, закрылках, рулях высоты и направления. Только в течение последнего года произошло два инцидента с российским самолетами ТУ-204, сопровождавшихся разрушением в воздухе руля высоты, причем, по мнению экспертов, именно наличие воды в сотах явилось одним из факторов разрушающего воздействия. Возможность накопления воды в сотах и степень серьезности этого вида дефектов фактически не была предусмотрена конструкторами, поэтому до сих пор отсутствует приемлемая технология его диагностики и "лечения".

Сотовые панели представляют собой две обшивки, между которыми находится ячеистая сотовая структура, состоящая из соединенных профилированных листов, образующих замкнутые ячейки квадратной или шестигранной формы. В конструкциях с несущими слоями из алюминиевого сплава материалом заполнителя обычно служит алюминиевая фольга (или бумага типа Nomex), соединяемая с несущими слоями при помощи клея. Толщина обшивки из дюралюминиевых листов составляет 0,5...1,5 мм, типичная толщина самих сот из алюминиевой фольги сот – 0,1 мм. Такие конструкции использованы в российских самолетах последнего поколения ИЛ-76, ИЛ-86 и др., а также в европейских аэробусах А-310 производства фирмы Airbus Industry. Сотовые конструкции, выполненные из полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяют на российских самолетах АН-72, ИЛ-96, ТУ-204, вертолетах Ка-50. Основными элементами, где может скапливаться вода, являются элероны, закрылки, рули высоты и направления, воздухозаборники, а также ряд фюзеляжных панелей.

Методы неразрушающего контроля воды в сотовых конструкциях

На данный момент можно выделить три способа неразрушающего контроля воды в сотовых конструкциях: радиационный, ультразвуковой и тепловой. Применение радиационного метода ограничивается лабораторными условиями, что связано со специфическими требованиями безопасности. В российских аэропортах достаточно широко применяется ультразвуковой метод, но он характеризуется малой производительностью и неспособностью контролировать вертикально-ориентированные панели самолетов, например, рули направления и фюзеляжные зализы. В данной работе рассмотрены особенности применения теплового метода неразрушающего контроля для обнаружения воды в сотовых панелях самолетов. Тепловой контроль использует динамические различия в температурах дефектной и бездефектной зон объекта испытаний при воздействии на него тепловой энергией различного вида. Появление на рынке современных измерительных тепловизоров, характеризующихся малой массой, отсутствием охлаждаемых приемников излучения и высокой чувствительностью, делает применение теплового метода привлекательным с точки зрения практики.

Компьютерное моделирование теплопередачи в сотовых структурах

Для моделирования процесса нагрева воды или льда в сотовой конструкции разработана компьютерная программа "MultiLayer1D", позволяющая определять температуру на поверхности и по глубине многослойной структуры, которая подвергается воздействию внешних источников тепла. Программный продукт позволяет моделировать одномерные структуры, состоящие из неограниченного числа слоев с произвольными теплофизическими характеристиками. В отличие из большинства известных программа, в том числе и коммерческих пакетов Matlab, LabView и т.п., в программе "MultiLayer1D" учитывается возможность фазовых переходов, которые имеют место при плавлении льда и замерзании воды. В основе разработанного алгоритма лежит одномерная математическая модель нагрева многослойной структуры [2]. Применительно к обнаружению воды в сотовых конструкциях вид исследуемых структур представлен на рис. 1.

Структура без дефекта | Структура с дефектом

1 2 3 4

Рис. 1. Модель обнаружения воды в самолетной сотовой панели: 1) обшивка, из дюралюминия или ПКМ; 2—4) слои клея, воздуха, воды или льда

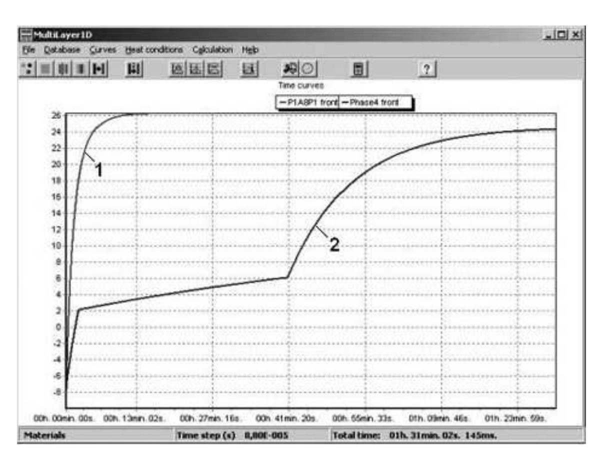


Рис. 2. Изменение поверхностной температуры в бездефектной (кривая 1) и дефектной (кривая 2) области при перемещении сотовой панели из среды с температурой –10 °С в среду с температурой +53 °С

Учет фазовых переходов при моделировании различных начальных и граничных условий позволил определить оптимальное время наблюдения температурных сигналов, обусловленных наличием воды или льда. Например, установлено, что при нагреве сотовой панели (толщина обшивки из ПКМ – 1 мм, толщина слоя воздуха – 8 мм для бездефектной

панели и 4 мм для структуры с дефектом, толщина слоя воды/льда – 4 мм) при нагреве в среде с температурой +53 °С, начальной температуре –10 °С и коэффициентах теплообмена на внешних поверхностях, равных 23 Вт/(м^2·К), температурный сигнал сохраняется 2 ч. На рис. 2 показано развитие температуры в бездефектной (кривая 1) и дефектной (кривая 2) областях. В отличие от общепринятой в тепловом контроле модели чистой теплопроводности, расчет в дефектной области выполнен с учетом плавления льда. Период времени, когда в массе льда происходит фазовое превращение, соответствует отчетливо наблюдаемой "полочке" в развитии температуры. Рост поверхностной температуры замедлен, поскольку поступающая из окружающей среды тепловая энергия расходуется на таяние льда.

Экспериментальные результаты

Обследования самолетов ТУ-204, проведенные в 2003–2004 гг. в аэропортах "Толмачево" (г. Новосибирск) и "Домодедово" (г. Москва), а также лабораторные исследования, проведенные в НИИ интроскопии при ТПУ, показали пригодность предложенной одномерной модели нагрева сотовой конструкции для оптимизации условий неразрушающих испытаний. На рис. 3 в качестве иллюстрации полученных экспериментальных результатов приведены термограммы правого и левого крыльев самолета ТУ-204 [3]. Съемку проводили через 40...60 мин после посадки при температуре окружающего воздуха +10 °С. Отчетливо видно различие в температурах поверхности элеронов, в частности, в правом элероне обнаружено значительное скопление воды, характеризующееся зонами пониженной температуры (участки черного цвета на рис. 3). Температурные сигналы, обусловленные скоплением воды, сохранялись в течение 4 ч после посадки самолета.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований положены в основу разработанной совместно с ГосНИИ ГА методики обследования самолетов в пассивном (после посадки) и активном (при дополнительном нагреве) режиме.



Рис. 3. Инфракрасные термограммы крыльев самолета ТУ-204

Повышение достоверности обнаружения зон с водой

Одной из важных задач при локализации зон с водой является выделение "полезных" температурных сигналов на фоне специфических помех. Под обшивкой самолета могут находиться различные конструктивные элементы (стрингеры, внутренние перегородки и т.п.), сигналы от которые при тепловизионном осмотре могут быть интерпретированы как соответствующие скоплениям воды. Для лабораторного моделирования такой ситуации был изготовлен эталонный образец, имитирующий сотовую конструкцию и содержащий включения воды, металла и резины. Процесс нагрева образца регистрировали с помощью тепловизора Thermovision 570 (спектральный диапазон 7...13 мкм, температурное разрешение 0,1 °С, частота кадров 30 Гц, формат кадра 320×240 элементов). На рис. 4 приведены термограммы образца в начале и через 12 мин после нагрева, зона 1 соответствует области с водой (льдом), зона 2 – области с резиновым включением, зона 3 – области с металлическим включением.

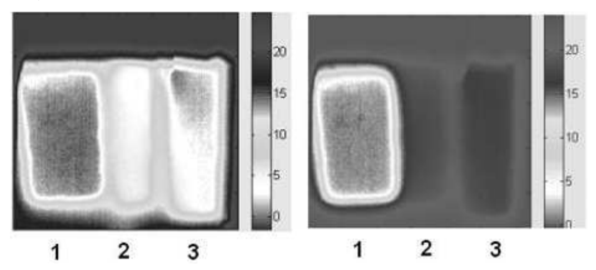


Рис. 4. Термограммы образца в начале и через 12 мин после нагрева

Экспериментальные данные обрабатывали с помощью алгоритма, реализованного с помощью пакета "Matlab 6.5" и использующего различные теплоемкости примененных материалов, а также наличие отмеченной выше "полочки", обусловленной фазовым переходом. Результатом обработки является термоизображение, на котором отчетливо видна зона с водой и отсутствуют дефектные отметки, обусловленные металлом и резиной (рис. 5).

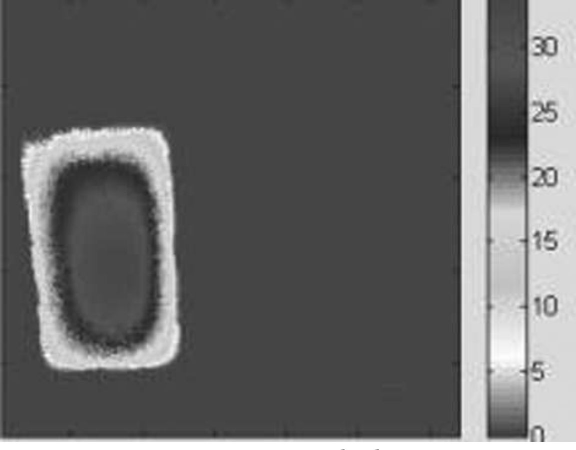


Рис. 5. Результат компьютерной обработки термограмм

Оценка количества воды

Наряду с локализацией зон с водой, важной задачей является оценка массы накопленной воды, которая необходима для применения норматива отбраковки и последующего удаления воды из зон, признанных дефектными. В настоящее время дан-

ный норматив, как и способы "лечения" сотовых панелей, находится в стадии разработки, в частности соответствующие исследования проводятся в ГосНИИ ГА. Для определения массы воды диагностические службы российских аэропортов используют ультразвуковой метод, который позволяет измерить водяной столбик высотой более 2 мм в отдельной соте. Тепловой метод контроля до сих пор является качественным и рекомендуется в качестве скринингового или дополнительного к ультразвуковому. Представляет интерес разработать способ приближенной оценки массы скрытой воды по аномалиям температуры, что в сочетании с высокой оперативностью тепловизионных осмотров позволит повысить привлекательность теплового метода.

Можно показать, что для этого целесообразно анализировать температуру на поверхности сотовой панели в период времени, когда в массе льда/воды происходят фазовые превращения. Например, пусть необходимо различить m_1=0,9 кг и m_2=1 кг воды с использованием источника энергии мощностью P=1 кВт. При отсутствии фазовых переходов, для нагрева этих количеств воды на ΔT=10 °C необходимо время $t=(cm\Delta T)/P$, где c – теплоемкость воды – 4200 Дж/(кг·K). Тогда t_1=37,8 с, t_2=42 с, а разность времен $t_2 - t_1$ составит около 4 с. Если учитывать фазовые переходы, то для плавления воды массой m необходимо время $t=(\lambda m)/P$, где λ – теплота плавления льда (340 кДж/кг), тогда t_1=306 с, и t_2=340 с; соответственно длительность интервала наблюдения составит 34 с. Таким образом, можно предположить, что анализ температурных полей в момент фазового перехода может облегчить оценку массы накопленной воды по сравнению с моделью чистой теплопроводности. Соответствующий алгоритм находится в стадии разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиммельфарб А.Л. Основы конструирования в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1971. – 312 с.
2. Никитенко Н.И. Исследование процессов тепло- и массообмена методом сеток. – Киев: Наукова думка, 1978. – 213 с.
3. Вавилов В.П., Климов А.Г., Антошкин С.А., Нестерук Д.А. Тепловизионная диагностика воды в авиационных сотовых панелях // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 2. – С. 11–12.

УДК 621.378:681.3:535